Archive of SID

بررسی پارامتریک نشست گروه شمع‌های بتنی واقع در خاک‌های دارای قابلیت روانگرایی

محمدحسین امین‌فر *[۱] و امین جلالی [۲]

[۱] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

[۲] کارشناس ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

یکی از علل بروز آسیب در سازه‌ها به هنگام زلزله، روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای می‌باشد. آسیب‌های زیادی در اثر روانگرایی به سازه‌های مستقر بر روی این خاک ها وارد می‌شود؛ به ویژه زمانی که این سازه‌ها درون خاک روانگرا شده قرار می‌گیرند. شمع‌ها یکی از این نوع سازه‌ها می‌باشند. شمع‌ها در واقع ستون‌های لاغری هستند که به صورت جانبی متکی به خاک پیرامون خود می‌باشند. شمع‌هایی که از لایه‌های خاک عبور می‌کنند، در اثر روانگرایی حاصل از زلزله، تکیه‌گاه جانبی خود را تا حد زیادی از دست می‌دهند. در این حالت شمع می‌تواند همانند ستون حمایت نشده، آمادگی برای ناپایداری محوری داشته باشد. این ناپایداری می‌تواند به کمانش جانبی شمع در جهت ضعیف‌تر و ایجاد مفصل پلاستیک بینجامد. تا به حال روش‌های مختلفی برای تحلیل و طراحی شمع‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای ارائه شده است؛ ولی در این روش‌ها اثرات روانگرایی خاک روی رفتار شمع‌ها در نظر گرفته نشده است. بنابر این در این مقاله نشست قائم گروه شمع با در نظر گرفتن رفتار خاک روانگرا توسط نرم‌افزار FLAC3D مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحلیل‌های دینامیکی انجام شده، ضخامت لایه روانگرا و طول شمع‌ها به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند تا اثرات تغییر این دو پارامتر بر نشست گروه شمع آشکار گردد. در سال‌های اخیر، موارد زیادی از گسیختگی پی‌های شمعی در اثر روانگرایی خاک‌ها اتفاق افتاده است که این مسئله موجب تخریب سازه‌های بنا شده بر روی آن‌ها را به همراه داشته است؛ بنابر این این گونه به نظر می‌رسد که رفتار شمع‌ها و روش تحلیل آن‌ها در خاک‌های روانگرا شده به طور کامل شناخته شده نیست. با توجه به این موضوع و این که ساخت و ساز در مناطق ساحلی در نقاط مختلف کشور به طور چشمگیری افزایش یافته است، در این مقاله میزان نشست گروه شمع در خاک روانگرا مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: روانگرایی، گروه شمع، نشست، تحلیل دینامیکی.

۱- مقدمه

کلمه روانگرایی که ابتدا توسط Mogami و Kubo [۱] ابداع شد، از نظر تاریخی همواره در ارتباط با پدیده‌های مختلف تغییر شکل خاک‌های اشباع غیر چسبنده در شرایط زهکشی نشده تحت اثر اغتشاشات گذرا، یکنواخت و یا تکراری می‌باشد. به وجود آمدن فشار منفذی در شرایط غیر زهکش، نشان اصلی تمام پدیده‌های روانگرایی است. تمایل خاک‌های غیر چسبنده به متراکم شدن در اثر بارگذاری استاتیکی و یا سیکلی امری شناخته شده است. هنگامی که خاک‌های غیر چسبنده، اشباع می‌باشند در اثر بارگذاری سریع در شرایط زهکشی نشده، تمایل به تراکم، موجب افزایش فشار آب حفره‌ای گشته و در نتیجه تنش‌های مؤثر کاهش می‌یابند. در این حالت، خاک وضعیتی شبیه مایع خواهد داشت و کرنش‌های بزرگ و تغییر شکل زیاد و پیوسته ایجاد می‌شود که این پدیده روانگرایی نامیده می‌شود.

Seed [۲] روانگرایی را به عنوان وضعیتی تعریف کرد که در آن خاک با یک مقاومت باقی‌مانده کم ثابت یا بدون هیچ مقاومتی دچار تغییر شکل پیوسته می‌گردد.

تعیین پاسخ لرزه‌ای پی‌های شمعی قرار گرفته در خاک‌های روانگرا شده مشکل بوده و مسائل مبهم زیادی در مکانیزم‌ها و اندرکنش خاک- شمع- سازه وجود دارد. با این وجود در دهه‌های اخیر مطالعات وسیعی در این زمینه صورت گرفته و آزمایش های گسترده ای با دستگاه سنتریفیوژ و میز لرزان انجام شده و همچنین روش های عددی متعددی در این زمینه ارائه شده است. این مطالعات را می توان به سه دسته بررسی‌های محلی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی تقسیم‌بندی نمود. بررسی‌های محلی عمدتاً برای شناسایی الگوهای گسیختگی، نشست و تغییر مکان جانبی شمع‌ها انجام می‌گیرند. موارد زیادی در زلزله‌های به وجود آمده مشاهده گردیده است که در آن‌ها پی‌های شمعی دچار تخریب کلی یا آسیب‌های جدی شده است.

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۳/۷/۱ پذیرش ۹۴/۱/۲۴

www.SID.ir

Archive of SID

آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه با دستگاه‌های سنتریفیوژ و میز لرزان انجام می‌گیرد. آزمایش‌های فراوانی در این زمینه صورت گرفته است که از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده می‌توان به آزمایش‌های انجام شده توسط Abdoun و Dobry [۳]، اشاره کرد که برای بررسی عملکرد خمشی پی‌های شمعی در برابر گسترش جانبی خاک اطراف آن با استفاده از دستگاه سنتریفیوژ ژئوتکنیکی انجام شده است.

همچنین در داخل کشور نیز مطالعاتی در این زمینه توسط حائری و همکاران [۴] انجام گرفته است و تغییرات فشار آب حفره‌ای، لنگرهای خمشی ایجاد شده در شمع‌ها و فشار اندرکنشی میان خاک و شمع تحت نیروهای زلزله و فشارهای جانبی ناشی از گسترش جانبی خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

ابزارهای شبیه‌سازی عددی در بررسی مسئله روانگرایی به دلیل امکان عدم دستیابی به نتایج مطلوب در مدل‌های فیزیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی، حائز اهمیت می‌باشند. به دلیل پیچیدگی محاسباتی و زمان زیاد مورد نیاز در تحلیل‌های دو و سه بعدی، بسیاری از محققین و طراحان در تحلیل لرزه‌ای پی‌های شمعی از مدل یک بعدی وینکلر که مبتنی بر روش عددی اجزای محدود و یا تفاضل محدود می‌باشد، استفاده می‌کنند.

در این تحقیق، سعی گردیده تا با استفاده از مدل رفتاری Finn که برای پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش ماسه‌های اشباع در شرایط زهکشی نشده ارائه شده است، در نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D، اثرات روانگرایی خاک بر نشست گروه شمع شبیه‌سازی گردد. در این تحقیق از چهار شمع بتنی با مقطع دایره استفاده شده است که این شمع‌ها به وسیله کلاهک به همدیگر متصل شده و در زمین متشکل از سه لایه خاک قرار گرفته‌اند که لایه میانی مستعد روانگرایی بوده و لایه‌های بالایی و پایینی غیر قابل روانگرا می‌باشند. دلیل استفاده از پروفیل خاک سه لایه‌ای نیز در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت می‌باشد؛ زیرا در این حالت بیشترین مقادیر تنش در شمع‌ها ایجاد می‌شود.

دلیل استفاده از نرم‌افزار FLAC3D برای انجام محاسبات، توانایی انجام تحلیل و مدل‌سازی پدیده روانگرایی با این نرم‌افزار می‌باشد. همچنین این نرم‌افزار دارای یک زبان برنامه‌نویسی قوی به نام FISH می‌باشد که امکان معرفی و اضافه نمودن مدل‌های رفتاری و توابع جدید به مدل وجود دارد.

برای انجام محاسبات نیز از رایانه‌ای با مدل VAIO-F23EFX استفاده شده است که مدت زمان اجرای هر تحلیل حدود ۴۲ ساعت می‌باشد که با افزایش طول شمع‌ها و مقدار المان Interface، این مقدار افزایش می‌یابد.

۲- مکانیزم وقوع روانگرایی و مدل رفتاری Finn

Finn و همکاران [۵] مدل ساده‌ای برای پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش ماسه اشباع در شرایط زهکشی نشده ارائه کردند. این مدل مبتنی بر این نظر است که تنش‌ها و کرنش‌های برشی دینامیکی ایجاد شده به وسیله زلزله سبب ایجاد لغزش در محل تماس دانه‌ها با هم می‌شود. در ماسه‌های اشباع تحت بار زلزله به دلیل سرعت بارگذاری، شرایط نزدیک به حالت زهکشی نشده بوده و تراکم حجمی رخ نمی‌دهد، چرا که آب نمی‌تواند برای تطبیق با این تغییر حجم به صورت آنی خارج شود. بنابر این در این حالت اسکلت ماسه مقداری از تنش مؤثر را به آب منفذی منتقل می‌کند و به این ترتیب فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. در حالت بحرانی، فشار آب منفذی ایجاد شده در اثر زلزله ممکن است تا آن‌جایی زیاد شود که تمامی تنش مؤثر بین دانه‌های ماسه از بین برود. در این حالت ماسه مقاومت برشی قابل توجهی نداشته و همانند یک سیال تغییر شکل می‌دهد. در چنین وضعیتی می‌گوییم که روانگرایی رخ داده است. مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی میزان فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در اثر زلزله وجود دارند؛ ولی از آن‌جایی که این مدل‌ها برای نمونه‌های خاصی در آزمایشگاه تهیه شده‌اند، برای شبیه‌سازی کامپیوتری کاربرد زیادی ندارند زیرا در برنامه‌های کامپیوتری مدل باید جامع و کلی باشد. در این مقاله از مدل Finn برای خاک ماسه-ای استفاده شده است و علت آن اولاً ساده بودن آن است و ثانیاً انطباق مناسبی با رفتار واقعی خاک دارد. در ادامه این بخش، نحوه استفاده از این مدل به طور مختصر تشریح می‌شود.

پاسخ اولیه ماسه به بارگذاری زلزله بستگی به مدول برشی اولیه، G_{m0}، دارد. پاسخ ماسه تا زمان رسیدن به نقطه برگشت اول، از رابطه تنش-کرنش هذلولی (۱) که توسط Konder و Zelasko [۶] بیان شده، تبعیت می‌کند.

$$\tau = \frac{G_{m0}.\gamma}{1+\frac{G_{m0}}{\tau_{m0}}.\gamma} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) تنش برشی، τ، بر حسب کرنش برشی، γ، مدول برشی مماسی ماکزیمم اولیه، G_{m0} و تنش برشی

www.SID.ir

Archive of SID

ماکزیمم اولیه τ_{m0} بیان می شود. Drnevich و Hardin پارامتر G_{m0} و τ_{m0} را بر حسب پوند بر فوت مربع، برای لایه-های افقی ماسه‌ای با استفاده از روابط (۲) و (۳) بیان نمودند [۷]:

$$G_{m0}=\frac{14.76\times(2.973-e)^2}{1+e}\times\left(\frac{1+2k_0}{3}\right)^{0.5}\times\sigma_v'^{0.5} \qquad (۲)$$

$$\tau_{m0}=\left[\left(\frac{1+k_0}{2}\sin\phi'\right)^2-\left(\frac{1-k_0}{2}\right)^2\right]^{0.5}\times\sigma_v' \qquad (۳)$$

روابط (۲) و (۳) بر حسب نسبت تخلخل e، تنش مؤثر قائم σ_v'، ضریب فشار زمین در حالت سکون K_0 و زاویه مقاومت برشی مؤثر φ' بیان می‌شود. اگر جهت بارگذاری در τ_r و γ_r تغییر کند، آن‌گاه رابطه منحنی تنش-کرنش در باربرداری و بارگذاری مجدد به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\tau-\tau_r}{2}=f\left(\frac{\gamma-\gamma_r}{2}\right) \qquad (۴)$$

در صورت عدم وجود فشار آب حفره‌ای و سخت شوندگی، روابط (۱) و (۴) بیان کننده پاسخ تنش-کرنش ماسه می‌باشند و این روابط وابستگی مدول برشی با کرنش را نشان می‌دهند. Finn و Martin رابطه (۵) را جهت اعمال اثر سخت شوندگی بر رابطه تنش-کرنش، ارائه داده‌اند:

$$\tau_{hv}=\frac{\gamma\sqrt{\sigma_v'}}{a+b\gamma} \qquad (۵)$$

در این رابطه، τ_{hv} تنش برشی افقی، γ کرنش برشی افقی، σ_v'، تنش مؤثر متوسط و a و b پارامترهای ثابتی هستند که با توجه به سیکل بارگذاری به دست می‌آیند. ماکزیمم مدول برشی در سیکل n ام، از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$G_{mn}=\frac{d\,\tau_{hv}}{d\gamma} \qquad (۶)$$

بعد از وقوع کرنش حجمی ε_{vd} و با توجه به روابط (۵) و (۶) و روابط ارائه شده برای پارامترهای a و b، معادلات (۷) و (۸) نتیجه می‌شود:

$$G_{mn}=G_{m0}\left(1+\frac{\varepsilon_{vd}}{H_1+H_2.\varepsilon_{vd}}\right) \qquad (۷)$$

$$\tau_{mn}=\tau_{m0}\left(1+\frac{\varepsilon_{vd}}{H_3+H_4.\varepsilon_{vd}}\right) \qquad (۸)$$

که در آن، G_{mn}، مدول برشی ماکزیمم ماسه خشک، τ_{mn} تنش برشی ماکزیمم ماسه خشک، ε_{vd} کرنش حجمی و H_iها مقادیر ثابتی می‌باشند. در کرنش برشی γ، رابطه میان افزایش فشار آب حفره ای، Δu، در آزمایش برش ساده زهکشی نشده و نمو کرنش حجمی، $\Delta\varepsilon_{vd}$، در آزمایش زهکشی شده، به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$\Delta u=\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\frac{1}{E_r}+\frac{n_p}{k_w}} \qquad (۹)$$

که در آن E_r، مدول برگشتی یک بعدی ماسه، n_p، پوکی خاک و k_w، مدول بالک آب می‌باشد. در ماسه‌های اشباع k_w بسیار بزرگ‌تر از E_r می‌باشد، بنابر این رابطه (۹) را می‌توان به صورت ساده زیر بیان نمود:

$$\Delta u=E_r.\Delta\varepsilon_{vd} \qquad (۱۰)$$

در مدل Finn، نمو کرنش حجمی با رابطه (۱۱) به کرنش حجمی تجمعی، ε_{vd}، و کرنش برشی، γ، ارتباط می‌یابد:

$$\Delta\varepsilon_{vd}=C_1(\gamma-C_2.\varepsilon_{vd})+\frac{C_3.\varepsilon_{vd}^2}{\gamma+C_4.\varepsilon_{vd}} \qquad (۱۱)$$

که در آن C_iها وابسته به تراکم نسبی و نوع ماسه هستند. برای تعیین مدول برگشتی یک بعدی ماسه نیز می‌توان از رابطه تجربی (۱۲) که بر حسب مقدار تنش مؤثر قائم می‌باشد، استفاده نمود:

$$E_r=\frac{(\sigma_v')^{1-m}}{m.K_2}\cdot(\sigma_{v0}')^{n-m} \qquad (۱۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

که در رابطه اخیر، σ'_{v0} تنش مؤثر قائم اولیه و K_2 و m و n ثابت‌های تجربی برای یک نوع ماسه مشخص می‌باشد.

Byrne [۸]، با ساده‌سازی رابطه (۱۱) را به صورت رابطه (۱۳) بیان نمود و نشان داد که در بسیاری از موارد می‌توان از روابط (۱۴) و (۱۵) استفاده نمود:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1.\exp(-C_2+\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma}) \qquad (۱۳)$$

$$C_1 = 7600\times(Dr)^{-2.5} \qquad (۱۴)$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \qquad (۱۵)$$

با استفاده از روابط (۹) تا (۱۵) می‌توان نمو فشار آب حفره‌ای، Δu، را با کرنش برشی، γ، در سیکل بارگذاری محاسبه نمود. مقدار جدید تنش مؤثر بر مدول برشی ماکزیمم، G_{mn} و تنش برشی ماکزیمم، τ_{mn} تأثیرگذار می‌باشد. در نتیجه مدول و تنش برشی ماکزیمم مطابق با فشار آب حفره‌ای و سخت شوندگی، برای چرخه nام بارگذاری به صورت روابط (۱۶) و (۱۷) بیان می‌شود:

$$G_{mn} = G_{m0}(1+\frac{\varepsilon_{vd}}{H_1+H_2.\varepsilon_{vd}}).(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}})^{0.5} \qquad (۱۶)$$

$$\tau_{mn} = \tau_{m0}(1+\frac{\varepsilon_{vd}}{H_3+H_4.\varepsilon_{vd}}).(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}}) \qquad (۱۷)$$

در نتیجه رابطه (۴) را می‌توان به صورت رابطه (۱۸) بیان نمود:

$$\frac{\tau-\tau_r}{2} = \frac{\frac{G_{mn}(\gamma-\gamma_r)}{2}}{1+\frac{G_{mn}\left|(\gamma-\gamma_r)\right|}{2\tau_{mn}}} \qquad (۱۸)$$

۳- عوامل مؤثر بر تحلیل دینامیکی

در فرآیند مدل‌سازی دینامیکی در نرم‌افزار FLAC سه مسئله مهم مد نظر قرار می‌گیرد [۹]:

- بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی مدل
- میرایی دینامیکی اختصاص داده شده به مدل
- شرایط انتقال موج در داخل مدل

در ادامه در بخش‌های جداگانه به این موضوعات پرداخته خواهد شد.

۳-۱- شرایط مرزی مدل

در تحلیل‌های استاتیکی، مرزهای انتهایی مدل به صورت گیردار مدل می‌شوند و بدین صورت ویژگی‌های تکیه‌گاهی واقع در مرزهای محیط واقعی به شکل قابل قبولی شبیه‌سازی می‌شود. با این حال در تحلیل‌های دینامیکی مرزهای گیردار موجب انعکاس امواج ارتعاشی شده و استهلاک انرژی مانند آن‌چه که در حالت واقعی رخ می‌دهد، اتفاق نمی‌افتد. به عبارت دیگر چنانچه مرزهای گیردار شده در حالت تحلیل دینامیکی اصلاح نشوند، زمانی‌که امواج به این مرزها می‌رسند به داخل محیط منعکس شده و مسئله را با خطا مواجه می‌کند.

در شبیه‌سازی زلزله‌ها، ورودی لرزه‌ای یک مدل اغلب به صورت امواج صفحه‌ای از قسمت تحتانی مدل به سمت بالا جریان می‌یابد. شرایط مرزی در قسمت‌های جانبی مدل باید این حالت را به صورت مناسب شبیه‌سازی کنند. در برخی موارد مرزهای جانبی گیردار شده به صورت معمولی می‌تواند مناسب باشد. استفاده از مرزهای گیردار باید در شرایطی باشد که این مرزها با فاصله مناسب از هم قرار داشته باشند تا انعکاس امواج در آن به حداقل برسد. در خاک‌هایی که میرایی مصالح بسیار بالا است، می‌توان مرزهای گیردار را در فواصل کوتاه از هم نیز تعبیه نمود. با این حال چنانچه میرایی مصالح پایین باشد، فاصله زیاد مرزهای گیردار موجب افزایش حجم محاسبات و به تبع آن افزایش زمان تحلیل خواهد شد. روش عملی برای این حالت تعریف کردن Free-field Boundaries برای مرزهای کناری است تا از طریق آن انعکاس امواج به حداقل ممکن برسد.

برای شبیه‌سازی Free-field Boundaries در قسمت‌های کناری مدل از میراگرهای ویسکوز استفاده می‌شود.

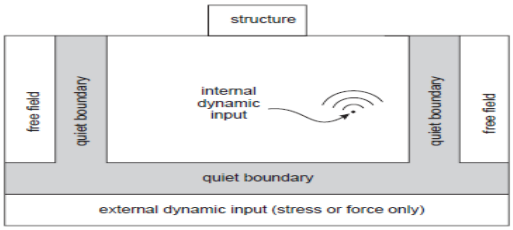
با اعمال Free-field Boundaries در قسمت‌های جانبی، پدیده انعکاس امواج در حین تحلیل ایجاد نخواهد شد و طرفین مدل به صورتی در خواهد آمد که گویی در قسمت‌های جانبی، مصالح خاکی یا سنگی در محیط نیمه بی‌نهایت امتداد دارد.

Free-field Boundaries در مدل‌سازی دینامیکی شامل یک ستون خاک هستند که رفتار محیط جانبی بی‌نهایت خارج از مدل را شبیه‌سازی می‌کند.

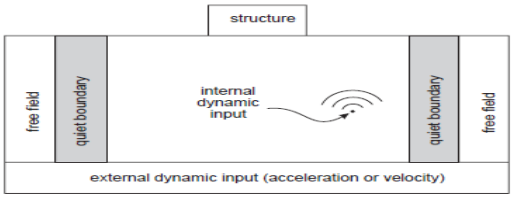
www.SID.ir

Archive of SID

همچنین به دلیل وارد کردن شتاب به مرز زیرین مدل، مرز زیرین صرفاً باید گیردار باشد، زیرا مرز گیردار شتاب اعمال شده را بدون هیچ گونه تغییر در مشخصات آن به مدل انتقال می‌دهد.



(a) Flexible base



(a) Rigid base

شکل ۱- انواع شرایط مرزی برای پی‌های صلب و انعطاف‌پذیر [۹]

۳-۲- میرایی مکانیکی

میرایی دینامیکی به کار رفته در آنالیزهای انجام شده، میرایی موضعی می‌باشد. میرایی موضعی در ابتدا برای تحلیل‌های شبه استاتیکی مورد استفاده قرار گرفت. با این حال این میرایی ویژگی‌هایی دارد که استفاده از آن را برای شبیه‌سازی دینامیکی توجیه‌پذیر می‌کند. این نوع میرایی با اضافه نمودن یا حذف کردن یک جرم از یک نقطه‌ی گرهی در یک دوره از نوسان عمل می‌کند. هنگامی که علامت سرعت در نوسان عوض می‌شود، جرم به مدل افزوده شده و وقتی که سرعت به نقطه حداقل یا حداکثر می‌رسد، از آن نقطه کم می‌شود. از این رو افزایش انرژی جنبشی در هر دوره از نوسان دو بار حذف می‌شود. چنانچه D بخشی از میرایی بحرانی باشد، ضریب میرایی موضعی برابر خواهد بود با:

$$\alpha_L = \pi D \qquad (۱۹)$$

به دلیل این که در محاسبه ضریب میرایی موضعی، فرکانس ارتعاش مد نظر قرار نمی‌گیرد، بنابر این استفاده از ضریب میرایی موضعی نسبت به سایر ضرایب میرایی آسان‌تر است.

۳-۳- انتقال موج در مدل

هنگام انتشار موج در محیط خاکی در هنگام تحلیل دینامیکی ممکن است تحت شرایط ناخواسته مدل‌سازی، اغتشاشات عددی رخ دهد. مقدار فرکانس اعمال شده بر محیط و سرعت موج بر دقت عددی شرایط انتقال موج، تأثیرگذار است. جهت دقت شرایط انتقال موج در محیط پیوسته خاک یا سنگ لازم است شرط توصیه شده توسط Kuhlemeyer و Lysmer اقناع شود. این دو محقق پیشنهاد داده‌اند اندازه زون‌های موجود در محیط پیوسته مورد مطالعه کوچک‌تر از مقدار رابطه زیر باشد:

$$\Delta l \le \frac{\lambda}{10} \qquad (۲۰)$$

در این رابطه، Δl اندازه بزرگ‌ترین المان بوده و λ طول موج، هنگام رخداد بیش‌ترین فرکانس در محیط است. از طرفی چنانچه C مقدار سرعت موج p یا s در محیط باشد و T دوره زمانی عبور موج، مقدار λ برابر خواهد بود با:

$$\lambda = C.T \qquad (۲۱)$$

۴- مدل‌سازی

در این مقاله به بررسی اثر ضخامت و طول شمع‌ها بر نشست گروه شمع‌های بتنی پرداخته شده است. مطابق شکل (۲) پروفیل خاک مورد بررسی شامل سه لایه می‌باشد که لایه‌های بالایی و پایینی غیر قابل روانگرا و لایه میانی دارای قابلیت روانگرایی است. از مشخصات ماسه Nevada [۱۰] با تراکم نسبی ۴۰ درصد در مدل کردن لایه میانی استفاده شده است. برای ضخامت لایه میانی سه حالت به مقادیر ۲، ۴ و ۶ متر در نظر گرفته شده است که در همه حالت‌های مورد بررسی لایه روانگرا در وسط پروفیل خاک قرار دارد.

گروه شمع مورد بررسی از چهار شمع بتنی به قطر ۸۰ سانتی‌متر تشکیل شده است که این شمع‌ها به وسیله کلاهک به همدیگر متصل شده‌اند. اتصال شمع‌ها به کلاهک نیز به صورت گیردار می‌باشد. مشخصات لایه‌های خاک و گروه شمع در جدول (۱) آورده شده است [۱۰، ۱۱]. برای طول گروه شمع‌ها همراه کلاهک نیز چهار حالت به اندازه‌های ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متر در نظر گرفته شده است تا تأثیر طول شمع‌ها به نشست گروه شمع معین گردد. ابعاد کلاهک نیز ۴ در ۴ متر می‌باشد که این ابعاد در طول تحلیل‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. بار وارده بر

www.SID.ir

Archive of SID

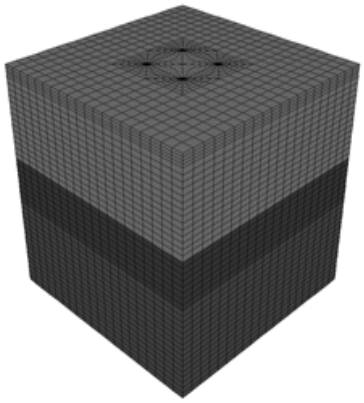
گروه شمع ۴ kg/cm^2 می‌باشد که در نتیجه کل نیروی وارده به گروه شمع برابر ۶۴۰ton می‌باشد. ابعاد مدل نیز در دو جهت افقی و قائم ۲۰ متر در نظر گرفته شده است.

به دلیل عدم پیوستگی شمع و خاک اطراف آن، مرزهای بین گروه شمع و خاک اطراف آن با المان Interface مدل شده است. المان Interface مجموعه‌ای از المان‌های مثلثی می‌باشد که با سه گره تعریف می‌شوند. از المان Interface برای مدل کردن مرزهایی استفاده می‌شود که مشخصات مصالح طرفین آن و میزان اتصال و پیوستگی آن‌ها با همدیگر تفاوت داشته باشند. برای مدل‌سازی المان Interface بایستی ویژگی‌هایی مانند زاویه اصطکاک، چسبندگی، سختی قائم و برشی تعیین شوند. در هر چرخه محاسباتی، مقادیر جابجایی قائم و سرعت برشی نسبی برای هر گره المان Interface محاسبه می‌شود و با استفاده از معیار مقاومت برشی خطی کولمب، بردارهای نیروی قائم و نیروی برشی برای المان Interface مشخص می‌گردند.

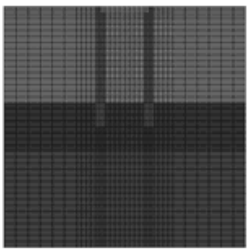
جزئیات شبکه مش‌بندی مدل مورد استفاده در تحلیل‌ها در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است.

در این تحقیق به دلیل این که از مرزهای آزاد در طرفین مدل استفاده شده است، نمی‌توان با استفاده از تقارن مدل، نصف مدل را آنالیز نمود و بایستی کل مدل آنالیز گردد.

در تحلیل‌های انجام شده، برای لایه‌های بالایی و پایینی از مدل رفتاری Mohr-Coulomb و برای لایه وسط از مدل رفتاری Finn استفاده شده است. همچنین برای گروه شمع نیز مدل الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. همچنین لازم به ذکر است که در تمامی تحلیل‌های انجام شده، سطح آب در تراز زمین در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- پروفیل خاک و موقعیت گروه شمع در مدل



شکل ۳- مقطعی از مدل

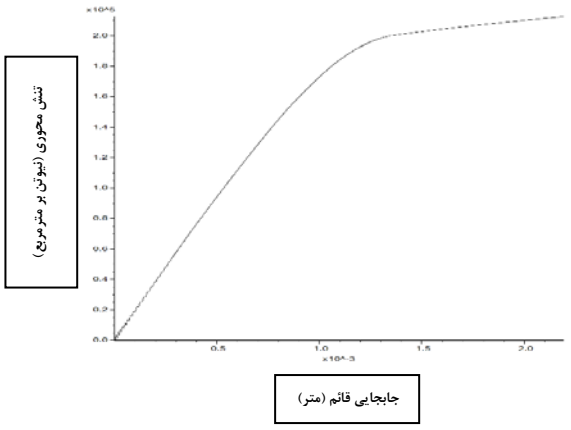
جدول ۱- پارامترهای لایه‌های خاک و گروه شمع و کلاهک [۱۰ و ۱۱]

	لایه پایینی	لایه میانی	لایه بالایی	گروه شمع و کلاهک
دانسیته (kg/cm^2)	۱۹۰۰	۱۵۳۷/۹۲	۱۸۰۰	۲۳۰۰
نسبت پواسن	۰/۳۵	۰/۴	۰/۳۵	۰/۲
مدول الاستیسیته (N/m^2)	۱×۱۰^{۸}	$۱۰^{۷}۱\times$	$۹\times^{۷}۱۰$	$۲/۴\times^{۱۰}۱۰$
مدول برشی (N/m^2)	$۱۰^{۷}۳/۷\times$	$۱۰^{۶}۳/۶\times$	$۱۰^{۷}۳/۳\times$	$۱\times^{۱۰}۱۰$
مدول حجمی (N/m^2)	$۱/۱۱\times۱۰^{۸}$	$۱۰^{۷}۱/۶۷\times$	۱×۱۰^{-۸}	$۱/۳۳\times^{۱۰}۱۰$
نفوذپذیری (m/s)	۳×۱۰^{-۶}	$۶/۶\times۱۰^{-۵}$	۵×۱۰^{-۶}	-
چسبندگی (N/m^2)	$۱/۵\times۱۰^{۴}$	۰	۲×۱۰^{-۴}	-
زاویه اصطکاک داخلی	۳۵	۳۳	۱۵	-
تخلخل	۰/۲۸	۰/۴۲۴	۰/۳۵	-

www.SID.ir

Archive of SID

قبل از بررسی رفتار دینامیکی مدل، ظرفیت باربری گروه شمع بررسی می‌گردد. بدین منظور طول گروه‌شمع ۸ متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد، حداکثر تنش محوری ایجاد شده در گروه شمع ۰/۲ مگاپاسکال می‌باشد؛ بنابر این و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲/۵، بار گسترده‌ای به شدت $4\ kg/cm^2$ به صورت بار محوری به کلاهک شمع وارد می‌شود.



شکل ۴- تغییرات تنش محوری ایجاد شده در قسمت فوقانی شمع‌ها در برابر جابه‌جایی قائم آن‌ها

۵- شتاب‌نگاشت اعمال شده به مدل

شتاب‌نگاشت ورودی مورد استفاده در کلیه تحلیل‌ها، مطابق شکل (۵) و مربوط به زلزله Kobe می‌باشد که دارای شتاب ماکزیمم $0.345g$ می‌باشد. دلیل انتخاب این زلزله به عنوان شتاب‌نگاشت اعمالی در تحلیل‌ها، وقوع روانگرایی وسیع در منطقه در زمان وقوع زلزله مذکور می‌باشد.

البته بایستی این نکته را در نظر داشت که چنانچه از نمودارهای شتاب‌نگاشت خام که از مراکز ثبت زلزله استخراج شده برای مدل‌سازی استفاده شود، ممکن است برنامه مقادیری از سرعت یا جابه‌جایی باقی‌مانده را بعد از ارتعاشات انجام گرفته در خروجی‌ها نشان دهد. این موضوع به این دلیل است که انتگرال دقیق تاریخچه‌های زمانی هیچ وقت برابر صفر نخواهد شد. برای این کار می‌توان یک موج با فرکانس ضعیف بر روی نمودار سرعت‌نگاشت اولیه اعمال کرد تا تا مقدار جابه‌جایی باقی‌مانده حول محور صفر نوسان کند که به این روند اصلاح خط پایه گفته می‌شود. اصلاح خط پایه روندی است که بیشتر در مورد شتاب‌نگاشت‌ها و سرعت‌نگاشت‌های پیچیده و نامنظم به کار می‌رود. برای این مهم می‌توان از نرم‌افزارهای تجاری رایج نیز استفاده نمود که در این مقاله از نرم‌افزار Seismosignal استفاده شده است.

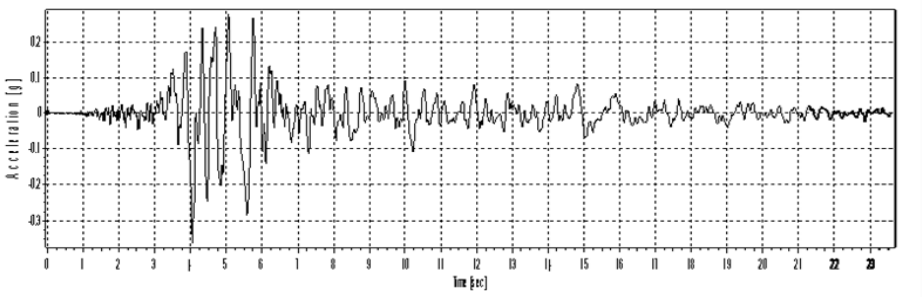
۶- صحت‌سنجی

در این قسمت به بررسی صحت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار مورد استفاده و مدل رفتاری به کار برده شده در لایه روانگرا پرداخته شده است.

به منظور بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار FLAC3D از روش Wroth & Randolph استفاده شده است؛ بدین صورت که نشست استاتیکی شمع منفردی با طول ۱۰ متر در پروفیل خاکی با ضخامت لایه میانی ۴ متر با رابطه ارائه شده توسط Wroth & Randolph محاسبه می‌گردد و با استفاده از رابطه (۲۳) نشست گروه شمع به دست آمده و با مقدار نشست به دست از نتیجه آنالیز انجام شده توسط نرم‌افزار مقایسه می‌گردد. مقدار نشست شمع با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta H_p = \frac{P}{G_L' . r_0}\left(\frac{1+\frac{4}{\eta(1-\mu)}\frac{1}{\pi\lambda}\frac{L_p}{r_0}\frac{\tanh(\upsilon L_p)}{\upsilon L_p}}{\frac{4}{\eta(1-\mu)}+\frac{2\pi\rho}{\xi}\frac{L_p}{r_0}\frac{\tanh(\upsilon L_p)}{\upsilon L_p}}\right) \qquad (۲۲)$$

$$\delta_g = \delta.\sqrt{\frac{B_g}{D}} \qquad (۲۳)$$

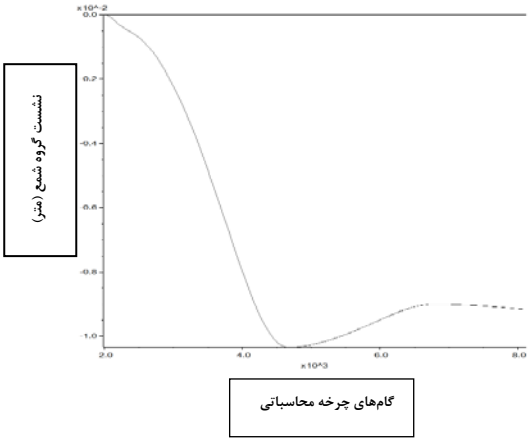


شکل ۱- شتاب‌نگاشت زلزله Kobe

www.SID.ir

Archive of SID

در رابطه (۲۲) با توجه به سازگاری واحدهای نیرو و طـول، E_p مدول الاستیسیته مصالح شمع، $G_L^{'}$ مدول برشی در نوک شمع، L_p عمق نفوذ شمع، r_0 شـعاع شـمع و P بـار شـمع می‌باشد. در رابطه (۲۳) نیز δ_g نشست گروه‌شـمع، δ نشسـت شمع منفرد، B_g عرض گروه و D قطر شمع است. با توجه بـه پارامترهای لایه‌های خاک و گروه شمع، مقدار نشست اسـتاتیکی گروه شمع ۹/۷۷ میلی‌متر محاسبه می‌گردد. نشسـت اسـتاتیکی محاسبه شده برای گروه شمع توسط نرم‌افـزار نیـز در شـکل (۶) آورده شده است.



شکل ۶- نشست استاتیکی گروه شمع

با مقایسه مقدار نشست به دست آمده از رابطه (۲۲) و شکل (۶)، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد نرم‌افزار مورد استفاده در انجام تحلیل‌ها مناسب می‌باشد.

همچنین به منظور صحت سنجی مدل رفتاری به کـار بـرده شـده در لایـه روانگـرا، از روش Tokimatsu & Seed اسـتفاده شده اسـت. در ایـن روش بـا در دسـت داشـتن $(N_1)_{60}$ (عـدد آزمایش نفوذ استاندارد) و نسبت تـنش سـیکلی ناشـی از زلزلـه، مقدار کرنش حجمی لایه روانگـرا بـه دسـت آمـده و بـا کـرنش حجمی به دست آمده از تحلیل صورت گرفته مقایسه مـی‌گـردد. مقدار تنش سیکلی ناشی از زلزله از رابطه زیر به دست می‌آید:

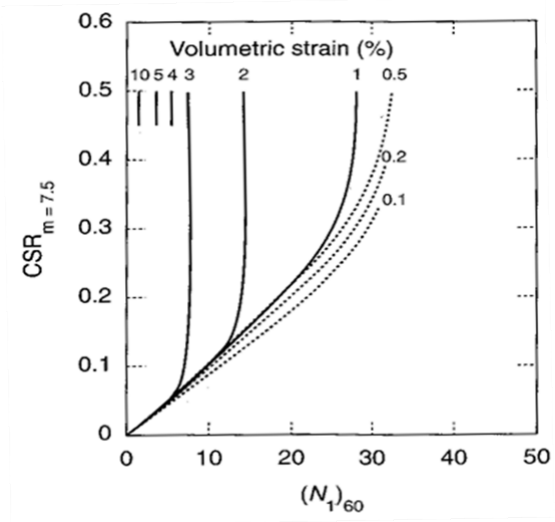
$$CSR = 0.65(a_{\max}/g).\frac{\sigma_v}{\sigma_0^{'}}.r_d \qquad (۲۴)$$

که در این رابطه، σ_v تنش قائم، $\sigma_0^{'}$ تنش مؤثر، r_d عامل کاهش تنش در نقطه مورد نظر و $a_{\max}$ شتاب افقـی زلزلـه بـر اساس شرایط زلزله خیزی می‌باشد. با در دست داشـتن CSR و $(N_1)_{60}$ و نیز با توجه به نمودار شکل (۷)، مقدار کرنش حجمی ناشی از زلزله به دست می‌آید.

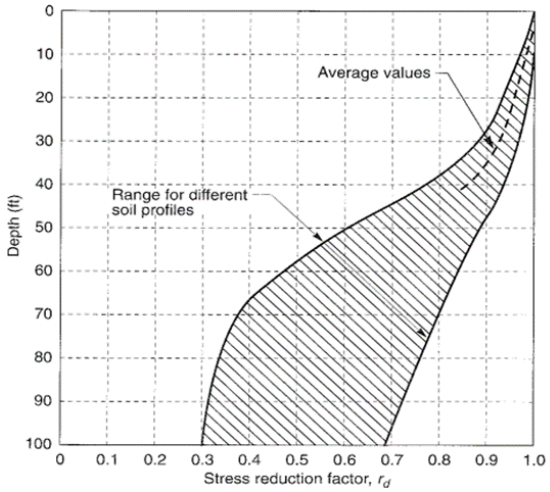
برای بررسی صحت مدل رفتاری Finn، ضخامت لایه میـانی (لایه مستعد روانگرایی) ۴ متر و تراکم نسبی آن نیـز ۴۰ درصـد در نظر گرفته شده است. در این حالت خواهیم داشت:

$$\sigma_v = 183080\,\mathrm{N/m^2}$$

$$\sigma_0^{'} = 83080\,\mathrm{N/m^2}$$



شکل ۷- تخمین کرنش حجمی در ماسه‌های اشباع با استفاده از CSR و $(N_1)_{60}$ [۱۲]



شکل ۸- تخمین عامل کاهش تنش بر اساس عمق [۱]

www.SID.ir

Archive of SID

برای محاسبه عامل کاهش تنش از نمودار شکل (۸) استفاده می شود. البته می‌توان از فرمول Liao & whitman نیز برای محاسبه عامل کاهش تنش استفاده نمود.

با توجه به نمودار فوق، در وسط لایه روانگرا (z=10 m) مقدار عامل کاهش تنش برابر ۰/۹۲ خواهد بود. همچنین در زلزله Kobe، $a_{\max} = 0.345g$ می‌باشد. پس خواهیم داشت:

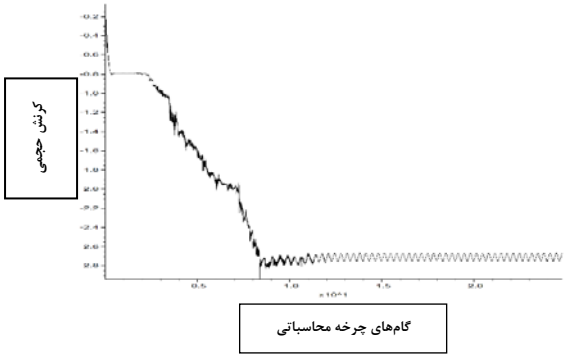
$$CSR = 0.455$$

با توجه به رابطه زیر و این که تراکم نسبی لایه میانی ۴۰ درصد می‌باشد، مقدار $(N_1)_{60}$ محاسبه می‌گردد:

$$Dr = 15(N_1)_{60}^{0.5} \square \ (N_1)_{60} = 7$$

با توجه به نمودار شکل (۷)، مقدار کرنش حجمی با استفاده از روش Tokimatso & Seed برابر ۳ درصد خواهد بود.

در شکل (۹) مقدار کرنش حجمی به دست آمده از آنالیز انجام شده در نرم‌افزار آورده شده است. بر اساس این شکل مقدار کرنش حجمی محاسبه شده برای لایه روانگرا ۲/۸ درصد می‌باشد. با توجه به اختلاف ناچیز نتایج به دست آمده می‌توان گفت که عملکرد مدل رفتاری Finn قابل قبول است.



شکل ۹- کرنش حجمی محاسبه شده برای لایه روانگرا شده

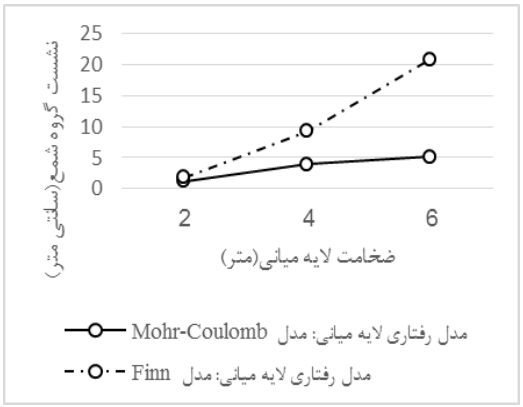
۷- نتایج تحلیل

همان طور که در قسمت‌های قبلی بیان گردید، متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق ضخامت لایه روانگرا و طول شمع می‌باشد که سه حالت برای ضخامت لایه روانگرا و چهار حالت برای طول شمع‌ها در نظر گرفته شده که در مجموع ۱۲ حالت مورد بررسی قرار گرفته است؛ تا اثرات تغییر توأم این دو پارامتر بر نشست گروه شمع بررسی شود. قبل از بررسی نتایج، لزوم در نظر گرفتن اثرات افزایش فشار آب حفره‌ای در لایه‌های روانگرا مورد بررسی قرار گرفته است.

۷-۱- اهمیت ملاحظه رفتار تنش-کرنش خاک‌های دارای قابلیت روانگرایی در شرایط زهکشی نشده

در این قسمت دو حالت مختلف در انجام تحلیل‌ها در نظر گرفته می‌شود. حالت نخست در انجام تحلیل‌ها، به کارگیری مدل رفتاری Mohr-Coulomb در هر سه لایه خاک می‌باشد. حالت دوم نیز، بکارگیری مدل رفتاری Mohr-Coulomb در لایه‌های بالایی و پایینی و مدل رفتاری Finn در لایه میانی که مستعد روانگرایی می‌باشد، است.

در انجام تحلیل‌های این قسمت، طول گروه شمع ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. از مقایسه نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که عدم در نظر گرفتن رفتار تنش-کرنش خاک‌های دارای قابلیت روانگرایی در شرایط زهکشی نشده، در حالی که ضخامت لایه روانگرا زیاد باشد، باعث ایجاد خطاهای بزرگ در محاسبات خواهد شد؛ به طوری که در ضخامت ۶ متر برای لایه میانی (لایه مستعد روانگرایی)، میزان نشست در صورت استفاده از مدل رفتاری Finn به جای مدل رفتاری Mohr-Coulomb، بیش از ۴ برابر خواهد بود؛ ولی اگر ضخامت لایه روانگرا کم باشد، تفاوت زیادی در نتایج به وجود نخواهد آمد.



شکل ۱۰- مقایسه نشست گروه شمع

۷-۲- تفسیر نتایج

قبل از بررسی نتایج بایستی از روانگرا شدن لایه وسط پس از اعمال بار لرزه‌ای اطمینان حاصل نمود. بدین منظور مقدار تنش مؤثر در وسط لایه میانی در طول اعمال بار لرزه‌ای بررسی

www.SID.ir

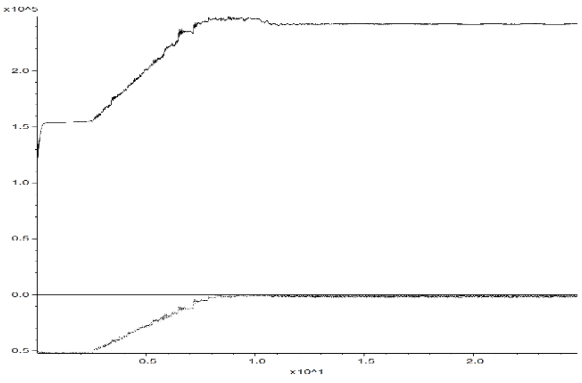
Archive of SID

گردیده است.

در شکل (۱۱) نمودار بالایی نشانگر تغییرات فشار آب حفره‌ای و نمودار پایینی نشانگر تغییرات تنش مؤثر در وسط لایه میانی می‌باشد. همان طوری که از شکل (۱۱) مشخص می‌باشد، از ثانیه هشتم به بعد فشارآب حفره‌ای افزایش یافته و تنش مؤثر به مقدار صفر رسیده و خاک به حالت روانگرایی اولیه می‌رسد.

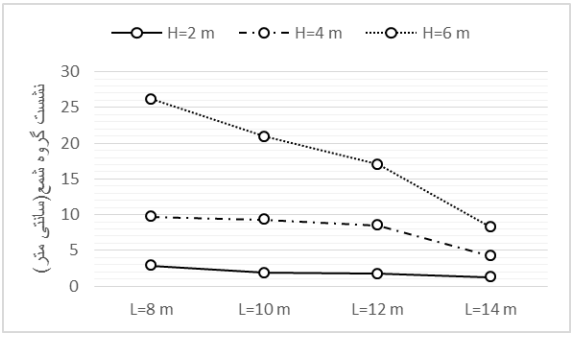
برای تفسیر بهتر نتایج به دست آمده از تحلیل‌های انجام شده، مقادیر نهایی نشست گروه شمع در حالات مختلف در نمودار شکل (۱۲) آورده می‌شود.

مطابق شکل (۱۲)، با افزایش ضخامت لایه میانی که روانگرا نیز شده است، میزان نشست گروه شمع افزایش می‌یابد. در ضخامت ۲ متر برای لایه روانگرا، مقدار نشست رخ داده در گروه شمع بسیار ناچیز می‌باشد؛ به طوری که می‌توان از نشست‌های ایجاد شده صرفنظر نمود. با افزایش ضخامت لایه روانگرا از ۲ به ۴ متر، مقدار نشست گروه شمع افزایش می‌یابد؛ به طوری که مقدار نشست ۳/۳۷~۵/۰۵ برابر خواهد بود. همچنین با افزایش ضخامت لایه روانگرا به ۶ متر، مقدار نشست گروه شمع نسبت به حالت قبلی ۱/۹۵~۲/۶۸ برابر می‌شود. دلیل افزایش نشست گروه شمع با افزایش ضخامت لایه روانگرا کاملاً واضح می‌باشد؛ با افزایش ضخامت لایه روانگرا، سطح تماس شمع و خاک روانگرا افزایش پیدا می‌کند که این امر باعث کاهش ظرفیت باربری گروه شمع خواهد شد. همچنین با روانگرایی خاک زیر نوک شمع‌ها، مقاومت انتهایی گروه شمع نیز به شدت کاهش می‌یابد و نشست گروه شمع‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- تغییرات فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر در وسط لایه میانی

همچنین مطابق شکل (۱۲)، با افزایش طول شمع‌ها، میزان نشست گروه شمع کاهش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش طول شمع و نزدیک شدن نوک شمع‌ها به لایه متراکم زیرین، مقدار نشست گروه شمع کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۱۲)، کم‌ترین مقدار نشست در گروه شمع‌های با طول ۱۴ متر اتفاق می‌افتد؛ زیرا گروه شمع‌های با این طول به خوبی در لایه متراکم زیرین نفوذ کرده‌اند که همین امر باعث افزایش مقاومت انتهایی شمع‌ها و در نتیجه کاهش نشست آن‌ها می‌گردد.



شکل ۱۲- مقادیر نشست ایجاد شده در گروه شمع به ازای مقادیر مختلف پارامترهای متغیر

۸- نتیجه‌گیری

در تحقیق انجام شده، نشست گروه شمع‌های بتنی در خاک‌های روانگرا مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات انجام شده با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام شده است و شتاب‌نگاشت زلزله Kobe به عنوان بار دینامیکی به مدل اعمال شده است. از مشخصات ماسه Nevada به عنوان خاک روانگرا استفاده شده است.

مطابق نتایج ارائه شده، اگر ضخامت لایه روانگرا زیاد باشد، در نظر گرفتن مدل رفتاری مناسبی که افزایش فشار آب حفره‌ای را به خوبی در خاک اعمال نماید، ضرورت دارد؛ ولی با کاهش ضخامت لایه روانگرا، این امر اهمیت کمتری خواهد داشت. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه بیان نمود زمانی که ضخامت لایه روانگرا کم باشد، حتی با افزایش آنی فشار آب حفره‌ای، امکان زهکشی فشار آب حفره‌ای ایجاد شده وجود دارد ولی در ضخامت‌های زیاد این امکان وجود ندارد.

بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش ضخامت لایه روانگرا، نشست گروه شمع افزایش می‌یابد که دلیل این امر کاهش ظرفیت باربری جداره و انتهای شمع‌ها می‌باشد. همچنین با افزایش طول شمع‌ها، رفته رفته نشست گروه شمع کاهش می‌یابد؛ دلیل این موضوع نیز افزایش مقاومت انتهایی شمع‌ها می‌باشد. بنابر این توصیه می‌شود در صورت وجود لایه روانگرا،

www.SID.ir

Archive of SID

به منظور کاهش نشست شمع‌ها، انتهای شمع‌ها به خوبی در لایه غیر روانگرای پایینی نفوذ کنند.

۹- مراجع

[1] Kramer, S. L., "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall Inc., New Jersey, 1996, Vol. I, pp 348-422.

[2] Seed, H. B., "Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquake", Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, ASCE Annual Convention and Exposition, 1976, 1-104.

[3] Abdoun, T., Dobry, R., "Evaluation of Pile Foundation Response to Lateral Spreading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2002, 22, 1051-1058.

[۴] حائری، س. م.، آصفزاده، آ.، کاوند، ع.، رحمانی، ا.، "بررسی پاسخ گروه شمع چهارتایی به پدیده گسترش جانبی ناشی از روانگرایی با استفاده از آزمایشات بزرگ مقیاس میز لرزان"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، اردیبهشت ۱۳۹۰.

[5] Finn, W. D. L., Lee, K. W., Martin, G. R., "An Effective Stress Model for Liquefaction", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103, 517-533.

[6] Konder, R. L., Zelasko, J. S., "A Hyperbolic Stress-Strain Formulation for Sands", the 2nd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 1963, 289-324.

[7] Hardin, B. O., Drnevich, V. P., "Shear Modulus and Damping in Soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1972, 98, 603-624.

[8] Byrne, P., "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for sand", The 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1991, pp 47-55.

[9] Itasca Consulting Group, "FLAC3D Version 3.00-Fast Lagrangian Analysis of Continua-User's Manual", Minneapolis, US, 2000.

[10] Liyanapathirana, D. S., Poulos, H. G., "Analysis of Pile Behavior in Liquefying Sloping Ground", ELSEVIER, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 37, 115-124.

[۱۱] صالحی، ی.، امام، س. م.، "بررسی عددی عوامل مؤثر بر نشست گروه شمع در خاک‌های روانگرا"، نهمین کنگره بین-المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۹۱.

www.SID.ir